

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет
«Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до лабораторних робіт у віртуальній лабораторії "Electronics
Workbench" з дисциплін
«Аналіз електронних схем сигової електроніки та перетворювальної
техніки»
для студентів спеціальності: 171 "Пристрої систем сигової
електроніки та перетворювальної техніки" всіх форм навчання

Методичні вказівки до лабораторних робіт у віртуальній лабораторії "Electronics Workbench" з дисципліни «Аналіз електронних схем си-
лової електроніки та перетворювальної техніки» для студентів спеці-
альності: 171 "Пристрої систем силових електроніки та перетворюва-
льної техніки" всіх форм навчання. /Укл.: С.М. Тиховод, П.Д. Андрі-
єнко – Запоріжжя: Національний університет «Запорізька політехні-
ка», 2024. – 58 с.

Укладачі: С.М. Тиховод, професор, д.т.н.,
П.Д. Андрієнко, професор, д.т.н.,

Рецензент: М.Л. Антонов доцент, к.т.н.,

Відповідальний за випуск: П.Д. Андрієнко професор, д.т.н.

Затверджено
на засіданні кафедри ЕЕА
Протокол № 5 від
09.11.23

Затверджено
на засіданні навчально-
методичної ради ЕТФ
Протокол № 3 від
23.11.23

ЗМІСТ

Передмова	4
РОЗДІЛ 1 Правила використання віртуальної комп'ютерної лабораторії на основі системи ELECTRONICS WORKBENCH	5
1.1. Панель компонентів	6
1.2. Базові компоненти	7
1.3. Прилади для проведення вимірювань	11
1.4. Моделювання схем	20
РОЗДІЛ 2 Лабораторні роботи	24
2.1. Лабораторна робота №1. Однофазні випрямлячі	24
2.2. Лабораторна робота №2. Однофазний мостовий випрямляч	31
2.3. Лабораторна робота №3. Однофазний мостовий керований випрямляч	36
2.4. Лабораторна робота №4. Трифазний випрямляч з нульовим виводом	39
2.5. Лабораторна робота №5. Моделювання некерованого трифазного мостового випрямляча	46
2.6. Лабораторна робота №6. Моделювання керованого трифазного мостового випрямляча	48
2.7. Лабораторна робота №7. Моделювання аварійних процесів у трифазних керованих пристроях силової електроніки	53
2.8. Лабораторна робота №8. Моделювання процесів у автономному інверторі	55
ЛІТЕРАТУРА	57
Додаток А Зразок титульного аркуша	58

ПЕРЕДМОВА

Під час виконання лабораторних робіт студенти повинні оволодіти основами практичного використання постійного та змінного струму, вимірювання електричних величин, навчитися аналізувати електричні та електронні схеми при зміні їх параметрів.

Виконання лабораторних робіт у віртуальній комп'ютерній лабораторії допомагає закріплювати та поглиблювати вивчення фізичних законів, закріплювати засвоєння теоретичної частини навчального курсу з дисципліни «Аналіз електронних схем силової електроніки та перетворювальної техніки» спеціальності "Пристрої систем силової електроніки та перетворювальної техніки", здобувати навички практичної роботи з електричними та електронними колами.

У методичних вказівках подаються правила використання віртуальної комп'ютерної лабораторії на основі системи Electronics Workbench. Даються не тільки короткі рекомендації, але й визначено порядок виконання лабораторних робіт та оформлення звіту, подані необхідні теоретичні пояснення та формули для розрахунків.

РОЗДІЛ 1

ПРАВИЛА ВИКОРИСТОВУВАННЯ ВІРТУАЛЬНОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ ЛАБОРАТОРІЇ НА ОСНОВІ СИСТЕМИ ELECTRONICS WORKBENCH

Система схемотехнічного моделювання *Electronics Workbench* (EWB) призначена для моделювання й аналізу електричних та електронних схем.

Electronics Workbench може проводити аналіз схем на постійному й змінному струмах в електричних та електронних колах.

В Electronics Workbench можна досліджувати перехідні процеси при впливі на схеми входних сигналів різної форми. Широкий набір приладів дозволяє робити вимірювання різних величин, задавати входні параметри, будувати графіки. Усі прилади зображуються у вигляді, максимально наближеному до реального, тому працювати з ними просто й зручно.

Результати моделювання можна вивести на принтер або імпортувати в текстовий або графічний редактор для їхньої подальшої обробки.

Electronics Workbench дозволяє розмістити схему таким чином, щоб були чітко видно всі з'єднання елементів і одночасно вся схема цілком.

Програма використовує стандартний інтерфейс Windows, що значно полегшує її використання.

У програмі використовується великий набір приладів для проведення вимірювань: амперметр, вольтметр, осцилограф, мультиметр, Бодє-Плоттер (графобудівник частотних характеристик схем), функціональний генератор, генератор слів, логічний аналізатор і логічний перетворювач.

Electronics Workbench дозволяє будувати схеми різного ступеня складності за допомогою наступних операцій:

- вибір елементів і приладів з бібліотек;
- переміщення елементів і схем у будь-яке місце робочого поля;
- поворот елементів і груп елементів на кути, кратні 90°;

- копіювання, вставка або видалення елементів, груп елементів, фрагментів схем і цілих схем;
- зміна кольору провідників;
- виділення кольором контурів схем для більш зручного сприйняття;
- одночасне підключення декількох вимірювальних приладів і спостереження їх показів на екрані монітора;
- присвоювання елементу умовної позначки;
- зміна параметрів елементів у широкому діапазоні тощо.

Усі операції проводяться за допомогою миші й клавіатури. Керування тільки із клавіатури неможливо.

Шляхом настроювання приладів можна:

- змінювати шкали приладів залежно від діапазону вимірів;
- задавати режим роботи приладу;
- задавати вид вхідних параметрів на схему (постійні й гармонійні струми й напруги, трикутні й прямокутні імпульси).

Графічні можливості програми дозволяють:

- одночасно спостерігати кілька кривих на графіку;
- відображати криві на графіках різними кольорами;
- вимірювати координати точок на графіку;
- імпортувати дані в графічний редактор, що дозволяє зробити необхідні перетворення рисунка й виведення його на принтер.

Electronics Workbench дозволяє використовувати результати, отримані в програмах PSpice, PCB, а також передавати результати на Electronics Workbench у ці програми. Можна вставити схему або її фрагмент у текстовий редактор і надрукувати в ньому пояснення або зауваження по роботі схеми.

1.1. Панель компонентів

Для операцій з компонентами на загальному полі EWB виділено дві області: панель компонентів і поле компонентів.

Панель компонентів (рис. 1.1) складається з піктограм полів компонентів, поле компонентів – з умовних зображень компонентів.

У бібліотеки елементів програми EWB входять аналогові, цифрові й цифро-аналогові компоненти.

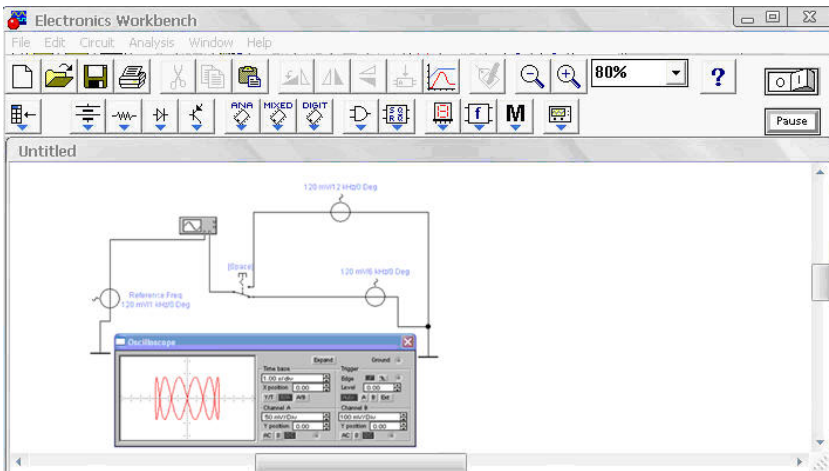


Рисунок 1.1- Панель компонентів

Усі компоненти можна умовно розбити на наступні групи:

- базові компоненти;
- джерела;
- лінійні компоненти;
- ключі;
- нелінійні компоненти;
- індикатори;
- логічні компоненти;
- вузли комбінаційного типу;
- вузли послідовного типу;
- гібридні компоненти.

1.2. Базові компоненти

З'єднуючий вузол
застосовується для з'єднання провідників і створення контрольних точок. До кожного вузла може приєднуватись не більш чотирьох провідників.

Заземлення.



Не всі схеми потребують заземлення для моделювання, однак будь-яка схема, що містить: операційний підсилювач; трансформатор; кероване джерело; осцилограф, повинна бути обов'язково заземлена, інакше прилади не будуть робити вимірювань або їх покази виявляться неправильними.

Джерела. Усі джерела в EWB ідеальні.

Некеровані джерела.

Джерело постійної напруги.



ЕРС джерела постійної напруги або батареї вимірюється у вольтах і задається похідними величинами (від мкВ до кВ). Батарея в EWB має внутрішній опір, рівний нулю, тому, якщо необхідно використовувати дві паралельно підключені батареї, слід включити послідовно між ними невеликий опір (наприклад, в 1 Ом).

Джерело постійного струму.



Струм джерела постійного струму (direct current) вимірюється в амперах і задається похідними величинами (від мкА до кА).

Джерело змінної напруги.



Діюче значення напруги джерела вимірюється у вольтах і задається похідними величинами (від мкВ до кВ). Є можливість установки частоти й початкової фази.

Діюче значення напруги V_{RMS} , що виробляється джерелом змінної синусоїдальної напруги, пов'язане з його амплітудним значенням V_{PEAK} наступним співвідношенням :

$$V_{RMS} = \frac{V_{PEAK}}{\sqrt{2}}$$

Джерело змінного струму.



Діюче значення струму джерела вимірюється в амперах і задається похідними величинами (від мкА до кА).

Генератор тактових імпульсів



виробляє послідовність прямокутних імпульсів. Відлік амплітуди імпульсів генератора проводиться від виводу, протилежного виводу «+».

Керовані джерела

Джерело напруги, кероване напругою.

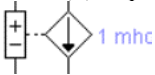


Відношення вихідної напруги до вхідної визначається коефіцієнтом пропорційності E , який задається у мВ/В, і

$$E = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \text{ кВ/В},$$

де V_{OUT} – вихідна напруга джерела; V_{IN} – вхідна напруга джерела.

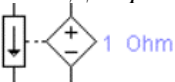
Джерело струму, кероване напругою.



Відношення вихідного струму до керуючої напруги – коефіцієнт G , вимірюється в одиницях провідності (1/Ом або Си-менс): $G = \frac{I_{OUT}}{V_{IN}}$,

де I_{OUT} – вихідний струм джерела; V_{IN} – напруга, прикладена до керуючих затискачів джерела.

Джерело струму, кероване струмом.

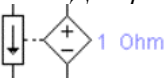


Вхідний і вихідний струми зв'язані коефіцієнтом пропорційності F , який визначає відношення вихідного струму до струму і задається в мА/А,

$$F = \frac{I_{OUT}}{I_{IN}},$$

де I_{OUT} – вихідний струм джерела; I_{IN} – вхідний струм джерела.

Джерело напруги, кероване струмом.



Передаючий опір H має розмірність опору й задається в мОм, Ом і кОм,

$$H = \frac{V_{OUT}}{I_{IN}},$$

де V_{OUT} – вихідна напруга джерела; I_{IN} – вхідний струм джерела.

Лінійні елементи.

Резистор.



Опір резистора вимірюється в Ом і задається похідними величинами (від Ом до Мом).

Змінний резистор.



Положення повзунка змінного резистора встановлюється за допомогою спеціального елемента – стрілки-регулятора. У діалоговому вікні можна встановити опір, початкове положення (у відсотках) і крок збільшення (також у відсотках). Є можливість змінювати положення повзунка за допомогою клавіш-ключів.

Використовувані клавіші-ключі:

- букви від А до Z;
- цифри від 0 до 9;
- клавіша Enter на клавіатурі;
- клавіша «пробіл».

Конденсатор.



Ємність конденсатора вимірюється у Фарадах і задається похідними величинами (від пФ до Ф).

Змінний конденсатор.



Величину ємності встановлюють, використовуючи її початкове значення й значення коефіцієнта пропорційності.

Значення ємності може встановлюватися за допомогою клавіш-ключів.

Котушка індуктивності.



Індуктивність котушки (дроселя) вимірюється в Генрі й задається похідними величинами (від мкГн до Гн).

Котушка зі змінною індуктивністю.



Величину індуктивності цієї котушки встановлюють, використовуючи початкове значення її індуктивності й коефіцієнта пропорційності. Значення індуктивності може встановлюватися за допомогою клавіш-ключів.

Трансформатор



може бути виконаний з відводом середньої точки.

1.3. Прилади для проведення вимірювань

Найпростішими приладами в EWB є вольтметр і амперметр, розташовані в полі індикаторів (Indicators), яке на панелі компонентів



зображується значком . Вони не вимагають настроювання, автоматично змінюючи діапазон вимірювань. В одній схемі можна застосовувати кілька таких приладів одночасно, спостерігаючи струми в різних вузлах і напруги на різних елементах.

Вольтметр  використовується для вимірювання змінної й постійної напруги. Виділена товстою лінією сторона прямокутника, що зображує вольтметр, **відповідає негативній клемі**.

Подвійним клацанням миші на зображенні вольтметра відкривається діалогове вікно для зміни параметрів вольтметра: виду вимірюваного напруги, величини внутрішнього опору. Величина внутрішнього опору вводиться із клавіатури в рядку Resistance, вид вимірюваної напруги (опція Mode) вибирається зі списку.

При вимірюванні змінної синусоїдальної напруги (AC) вольтметр буде показувати діюче значення напруги U_d , обумовлене по формулі

$$U_d = \frac{U_m}{\sqrt{2}},$$

де U_m – амплітудне значення напруги.

Внутрішній опір вольтметра 1 Мом, встановлений за замовчуванням, у більшості випадків становить дуже малий вплив на роботу схеми. Його значення можна змінити, однак використання вольтметра з дуже високим внутрішнім опором у схемах з низьким вихідним

імпедансом може привести до математичної помилки під час моделювання роботи схеми.

У якості вольтметра можна використовувати мультиметр.

Амперметр  використовується для вимірювання змінного й постійного струму. Виділена **товстою** лінією сторона прямокутника, що зображує амперметр, відповідає **негативній клемі**.

Подвійним клацанням миші на зображенні амперметра відкривається діалогове вікно для зміни параметрів амперметра: виду вимірюваного струму, величини внутрішнього опору.

Величина внутрішнього опору вводиться із клавіатури в рядку Resistance, вид вимірюваного струму (опція Mode) вибирається зі списку. При вимірюванні змінного синусоїдального струму (AC) амперметр буде показувати його діюче значення I_d :

$$I_d = \frac{I_M}{\sqrt{2}},$$

де I_M – амплітудне значення струму.

Внутрішній опір 1 МОм, установлений за замовчуванням, у більшості випадків виявляє дуже малий вплив на роботу схеми. Його значення можна змінити, однак використання амперметра з дуже маленьким внутрішнім опором у схемах з високим вихідним імпедансом може привести до математичної помилки під час моделювання роботи схеми.

У якості амперметра можна використовувати мультиметр.

Крім описаних амперметра й вольтметра в EWB є сім приладів, із численними режимами роботи, кожний з яких можна використовувати в схемі тільки один раз. Ці прилади розташовані на панелі приладів.

Ліворуч на панелі розташовані прилади для формування й спостереження аналогових величин: мультиметр, функціональний генератор, осцилограф, Боде-Плоттер:



Рисунок 1.2 - Мультиметр, функціональний генератор, осцилограф, Боде-Плоттер

Праворуч розташовані прилади для формування й спостереження логічних величин: генератор слів, логічний аналізатор, логічний перетворювач:

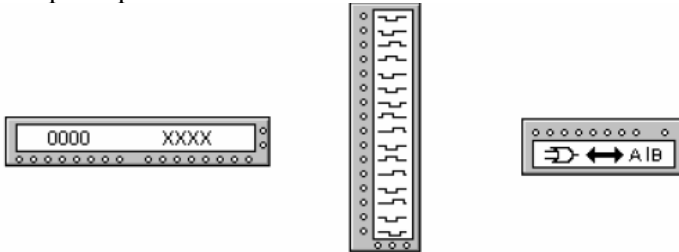


Рисунок 1.3 - прилади для логічних величин

Мультиметр використовується для вимірювання: напруги (постійної й змінної), струму (постійного й змінного), опору, рівня напруги в децибелах.



Рисунок 1.4 - Мультиметр

Для налаштування мультиметра потрібно подвійним клацанням миші на його зменшеному зображенні відкрити його збільшене зображення. На збільшеному зображенні натисканням лівої кнопки миші вибирається: вимірювана величина по одиницях вимірювання – A , V , Ω або db ; вид вимірюваного сигналу – змінний або постійний; режим установки параметрів мультиметра.

Установка виду вимірюваної величини проводиться натисканням відповідної кнопки на збільшеному зображенні мультиметра. Натискання кнопки із символом «~» встановлює мультиметр для вимірювання діючого значення змінного струму й напруги, постійна складова сигналу при вимірі не враховується. Для вимірювання пос-

тійних напруги й струму потрібно на збільшеному зображенні мультиметра натиснути кнопку із символом «←».

Для того, щоб використовувати мультиметр для вимірювань напруги, струму, опору або рівня напруги в децибелах, потрібно натиснути кнопку на збільшеному зображенні мультиметра: A , V , Ω або dB відповідно.

У якості амперметра й вольтметра мультиметр використовується так само, як і стандартні прилади.

Мультиметр – єдиний в EWB стандартний прилад, призначений для вимірювання опору. Для використання мультиметра в якості омметра його слід приєднати паралельно ділянці кола, опір якого потрібно виміряти, на збільшеному зображенні мультиметра натиснути кнопку Ω і кнопку із символом «←» перемикаання в режим виміру постійного струму. Включити схему. На табло мультиметра при цьому з'явиться виміряне значення опору.

Щоб уникнути помилкових показів, схема повинна мати з'єднання із землею й не мати контакту із джерелами живлення, які повинні бути виключені зі схеми, причому ідеальне джерело струму повинне бути замінене розривом кола, а ідеальне джерело напруги – короткозамкнутою ділянкою.

Для вимірювання рівня напруги в децибелах на збільшеному зображенні мультиметра слід натиснути кнопку dB .

Мультиметр підключається одним з виводів до точки, рівень напруги в якій потрібно виміряти, а іншим виводом – до точки, щодо якої проводиться вимір. При вимірювання рівня змінної напруги вимірюється рівень діючого значення.

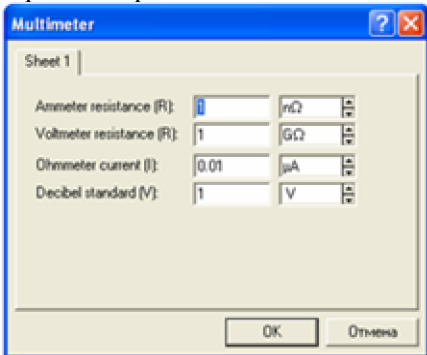


Рисунок 1.5 - Настроювання мультиметра

Після включення схеми на табло мультиметра з'явиться виміряне значення рівня напруги. Рівень напруги в децибелах підраховується в такий спосіб:

$$dB = 20 \lg \frac{|U_{\text{вх}}|}{U_{\text{оп}}},$$

де $U_{\text{вх}}$ – напруга, прикладена до виводів мультиметра; $U_{\text{оп}}$ – опорна напруга, стосовно якої вимірюється рівень напруги.

За замовчуванням опорна напруга встановлена рівною 1 В.

Клавішу *SETTINGS* слід використовувати для налаштування вхідного опору вольтметра, послідовного опору амперметра, вимірювального струму омметра, опорної напруги для відліку в децибелах.

Осцилограф,  в програмі EWB, являє собою аналог дво-променевого запам'ятовувального осцилографа й має дві модифікації: просту й розширену.

На схему виводиться зменшене зображення осцилографа, загальне для обох модифікацій. На цьому зображенні є чотири вхідних затискача. Верхній правий затискач називають загальним, так як потенціал на цьому виводі є спільною точкою щодо якої осцилограф вимірює напругу. Зазвичай цей вивід заземлюють, щоб осцилограф вимірював напругу щодо нуля. Тому на панелі осцилографа цей вивід позначений "ground". Затискач, що нижче, – вхід синхронізації. Лівий і правий нижні затискачі є відповідно вхід каналу А (channel A) і вхід каналу В (channel B).

Розширена модифікація по своїх можливостях наближається до кращих цифрових запам'ятовувальних осцилографів. Через те, що розширена модель займає багато місця на робочому полі, рекомендується починати дослідження з простою моделлю, а для докладного дослідження процесів – використовувати розширену модель.

Осцилограф можна підключити до вже включеної схеми або під час роботи схеми переставити виводи до інших точок – зображення на екрані осцилографа зміниться автоматично.

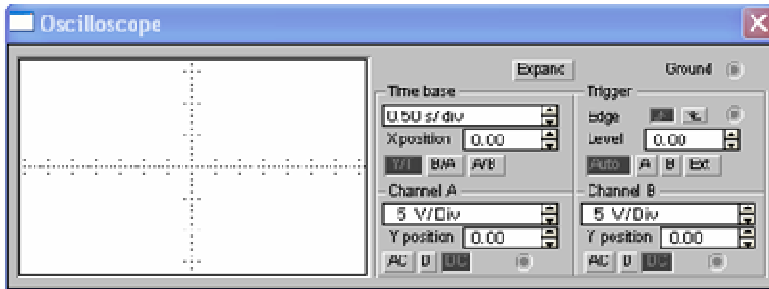


Рисунок 1.6 – Осцилограф

Подвійним клацанням миші по зменшеному зображенню відкривається зображення передньої панелі простої моделі осцилографа із кнопками керування, інформаційними полями й екраном.

Для проведення вимірювань осцилограф потрібно настроїти, для чого слід задати:

- 1) розташування осей, по яких відкладається сигнал;
- 2) потрібний масштаб розгорнення по осях;
- 3) зсув початку координат по осях;
- 4) режим роботи із входу: закритий або відкритий;
- 5) режим синхронізації: внутрішній або зовнішній.

Настроювання осцилографа проводиться за допомогою полів керування, розташованих на панелі керування.

Панель керування має загальний для обох модифікацій осцилографа вигляд і розділена на чотири поля керування:

- 1) горизонтальною розгорткою (*Time base*);
- 2) синхронізацією (*Trigger*);
- 3) каналом *A*;
- 4) каналом *B*.

Поле керування горизонтальною розгорткою (масштабом часу) служить для завдання масштабу горизонтальної осі осцилографа при спостереженні напруги на входах каналів *A* і *B* залежно від часу. Часовий масштаб задається в: (s/div, ms/div, μ s/div, ns/div відповідно). Величина однієї поділки може бути встановлена від 0,1 нс до 1 с.

Масштаб може дискретно зменшуватися на один крок при клацанні мишею на кнопці праворуч від поля й збільшуватися при клацанні на

кнопці .

За допомогою кнопок, розташованих у полі рядка *X POS*, можна дискретно зсувати початок осцилограм по горизонтальній осі. У цім же полі розташовано три кнопки: *Y/T*, *A/B*, *B/A*, що дозволяють задавати вигляд залежності відображуваних сигналів. При натисканні на кнопку *Y/T* по вертикальній осі відкладається напруга, по горизонтальній осі – час, при натисканні на кнопки *A/Y* по вертикальній осі відкладається амплітуда напруги на вході каналу *A*, по горизонтальній осі – каналу *B* і при натисканні на кнопку *B/A* навпаки. При цьому масштаб осей визначається установками відповідних каналів. У режимах *A/Y* і *B/A* можна спостерігати частотні й фазові зрушення (фігури Ліссажу), петлі гістерезису, вольт-амперні характеристики і т. д.

Дві нижні частини панелі осцилографа є полями керування відображенням сигналів, поданих на входи каналів *A* і *B* відповідно. Верхнє вікно в поле дозволяє управляти масштабом осі відображуваної напруги по вертикальній або горизонтальній осі. Ціна поділок може дискретно встановлюватися від 10 mV/div до 5 kV/div. Масштаб для кожної осі встановлюється окремо. Щоб одержати зручне для роботи зображення на екрані осцилографа перед початком експерименту, слід установити масштаб, відповідний до очікуваної напруги.

Нижче розташоване поле, яке дозволяє дискретно посувати вісь *X* вгору або вниз. Для того, щоб розвести зображення від каналів *A* і *B*, слід скористатися зсувом по осі *Y* (*Y POS*) для одного або двох каналів.

Три нижні кнопки реалізують різні режими роботи входу осцилографа по входам. Режим роботи осцилографа із закритим входом установлюється натисканням на кнопку *AC*. У цьому режимі на вхід не пропускається постійна складова сигналу. При натисканні на кнопку *DC* осцилограф переходить у режим з відкритим входом. У цьому режимі на вхід осцилографа пропускається як постійна, так і змінна складова сигналу. При натисканні на кнопку *0* вхід осцилографа з'єднується із загальним виводом осцилографа, що дозволяє визначити положення нульової оцінки по осі *Y*.

Верхнє праве поле керування *TRIGGER* визначає момент початку відображення осцилограм на екрані осцилографа. Кнопки в рядку *EDGE* задають момент запуску осцилограм по фронту або по зрізу імпульсу на вході синхронізації. Поле *LEVEL* дозволяє задавати

рівень, при перевищенні якого відбувається запуск осцилограми. Значення рівня можна зсунути на три поділки вниз або нагору.

Осцилограф має чотири режими синхронізації.

1. Автоматичний режим (*AUTO*) – запуск осцилограми проводиться автоматично при підключенні осцилографа до схеми або при її включенні. Коли «промінь» доходить до кінця екрана, осцилограма знову прописується з початку екрана (новий екран).
2. Режими запуску по входу *A* або *B*, у яких сигналом, що запускає, є сигнал, що надходить на відповідний вхід.
3. Режим «Зовнішній запуск» (*EXT – external*). У цьому випадку сигналом запуску є сигнал, що подавався на вхід синхронізації.

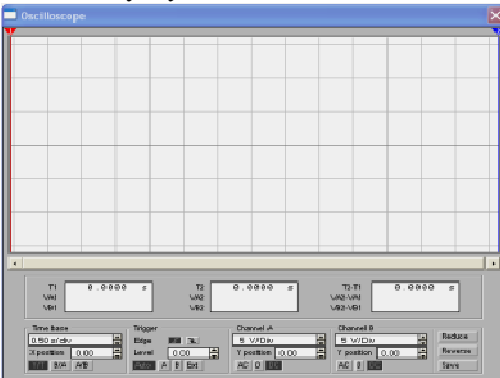


Рисунок 1.7 - Вікно розширеної моделі осцилографа.

Натискання клавіші *Expand* на панелі простої моделі відкриває вікно розширеної моделі осцилографа.

Панель розширеної моделі осцилографа на відміну від простої моделі розташована під екраном і доповнена трьома інформаційними таблицями, на які виводяться результати вимірювань. Крім того, безпосередньо під екраном перебуває лінійка прокручування, що дозволяє спостерігати будь-який часовий відрізок процесу від моменту включення до моменту вимикання схеми. По суті, розширена модель осцилографа -- це зовсім інший прилад, що дозволяє набагато зручніше й більш точно проводити числовий аналіз процесів.

На екрані осцилографа розташовано два курсори, позначені 1 і 2, за допомогою яких можна виміряти миттєві значення напруги у

будь-якій точці осцилограми. Для цього слід просто перетягнути мишею курсори за трикутники в їхній верхній частині в необхідне положення. Координати точок перетинання першого курсору з осцилограмами відображаються на лівому табло, координати другого курсору – на середньому табло. На правому табло відображаються значення різниць між відповідними координатами першого й другого курсорів. Результати вимірювань, отримані за допомогою розширеної моделі осцилографа, можна записати у файл. Для цього слід натиснути кнопку *Save* (Зберегти) і в діалоговому вікні ввести ім'я файлу. Щоб повернутися до колишнього зображення осцилографа, слід натиснути клавішу *REDUCE*, розташовану в правому нижньому куті.

Функціональний генератор  є ідеальним джерелом напруги, що виробляє сигнали синусоїдальної, прямокутної або трикутної форми.

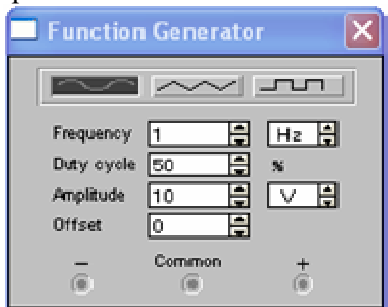


Рисунок 1.8 - Функціональний генератор

Середній вивід генератора при підключенні до схеми забезпечує загальну точку для вимірювання амплітуди змінної напруги. Для вимірювання напруги щодо нуля загальний вивід заземлюють.

Крайні правий і лівий виводи служать для подачі змінної напруги на схему. Напруга на правому виводі змінюється в позитивному напрямку щодо загального виводу, напруга на лівому виводі – у негативному. При подвійному клацанні мишею по зменшеному зображенню функціонального генератора відкривається його збільшене зображення.

а) Установка форми сигналу.

Вибрати необхідну форму вихідного сигналу й натиснути на кнопку з відповідним зображенням. Форму трикутного й прямокутного сигнала

лів можна змінити, зменшуючи або збільшуючи значення в полі *DUTY CYCLE* . Цей параметр визначається для сигналів трикутної й прямокутної форми. Для трикутної форми напруги він задає тривалість (у відсотках від періоду сигналу) між інтервалом наростання напруги й інтервалом спаду. Установивши, наприклад, значення 20, можна одержати тривалість інтервалу наростання 20 % від періоду, а тривалість інтервалу спаду – 80 % . Для прямокутної форми напруги цей параметр задає співвідношення між тривалостями позитивної й негативної частини періоду.

б) *Установка частоти сигналу.*

Частота генератора може регулюватися від 1 Hz до 999 MHz. Значення частоти встановлюється в рядку *FREQUENCY* за допомогою клавіатури й кнопок зі стрілками. У лівому полі встановлюється чисельне значення, у правому – одиниця вимірювання (Hz, kHz, MHz – Гц, кГц, МГц відповідно).

в) *Установка амплітуди вихідної напруги.*

Амплітуда вихідної напруги може регулюватися від 0 мВ до 999 кВ. Значення амплітуди встановлюється в рядку *AMPLITUDE* за допомогою клавіатури й кнопок зі стрілками. У лівому полі встановлюється чисельне значення, у правому – одиниця виміру (μ V, mV, V, kV – мкВ, мВ, В, кВ відповідно).

г) *Установка постійної складової вихідної напруги.*

Постійна складова змінного сигналу встановлюється в рядку *OFFSET* за допомогою клавіатури або кнопок зі стрілками. Вона може мати як позитивне, так і негативне значення. Це дозволяє одержати, наприклад, послідовність однополярних імпульсів.

1.4. Моделювання схем

EWB дозволяє будувати аналогові, цифрові й цифро-аналогові схеми різного ступеня складності. Досліджувана схема збирається на робочому полі при одночасному використанні миші й клавіатури. Застосування в роботі тільки клавіатури неможливо. При побудові й редагуванні схем виконуються наступні операції:

- а) вибір компонента з бібліотеки компонентів;
- б) виділення об'єкта;

- в) переміщення об'єкта;
- г) копіювання об'єктів;
- д) видалення об'єктів;
- е) з'єднання компонентів схеми провідниками;
- ж) установка значень компонентів;
- з) підключення приладів.

Якщо схема не поміщається на екрані монітора, будь-яку її ділянку можна переглянути за допомогою лінійок прокручування, розташованих праворуч і під робочим полем. Після побудови схеми й підключення приладів аналіз її роботи починається після натискання вимикача в правому верхньому куті вікна програми.

Зробити паузу при роботі схеми можна натисканням кнопки *Pause* під вимикачем. Відновити процес можна повторним натисканням кнопки *Pause*. Повторне натискання вимикача в правому верхньому куті припиняє роботу схеми.

Вибір потрібного компонента проводиться з поля компонентів; потрібне поле компонентів вибирається натисканням лівої кнопки миші на одній з піктограм панелі компонентів. При цьому в поле компонентів з'являються зображення відповідних компонентів. Після вибору поля компонентів потрібний компонент за допомогою миші переміщається на робоче поле.

Виділення об'єкта здійснюється за допомогою миші (під об'єктом мається на увазі як один компонент, так і група компонентів). При виборі компонента потрібно встановити покажчик миші на потрібний компонент (при цьому зображення покажчика зміниться на  й клацнути лівою кнопкою миші. Для вибору групи компонентів потрібно встановити покажчик миші в один з кутів прямокутної області, що містить групу, і, натиснувши ліву кнопку миші, розтягнути рамку до необхідних розмірів, після чого відпустити кнопку. Обраний об'єкт змінює свій колір на червоний. Зняти виділення можна клацанням миші в будь-якій точці робочого поля.

Об'єкт можна повертати на кут, кратний 90° . Для цього об'єкт потрібно попередньо виділити, а потім вибрати команду *Rotate* з меню *Circuit*, натиснути *Ctrl + R* або на робочій панелі натиснути кноп-

ку . При цьому об'єкт повернеться на 90° за годинниковою стрілкою. При повороті групи компонентів на 90° повертається кожний компонент, а не вся група цілком.

Копіювання об'єктів здійснюється за допомогою команди з меню *Edit*, натисканням *Ctrl + C* або на робочій панелі натиснути кнопку



. Перед копіюванням об'єкт потрібно виділити. Після виконання команди виділений об'єкт копіюється в буфер. Для вставки вмісту буфера на робоче поле потрібно вибрати команду *Paste* з меню *Edit*,



натиснути *Ctrl + V* або на робочій панелі натиснути кнопку . Після виконання команди вміст буфера з'явиться на робочому полі й буде виділено кольором.

Видалення об'єкта здійснюється командами *Cut* (на робочій панелі



кнопка) і *Delete*. Відмінність полягає в тому, що при виконанні команди *Cut* об'єкт вставляється в буфер і може бути потім вставлений назад на робоче поле, а при виконанні команди *Delete* об'єкт видаляється зовсім. Перед видаленням об'єкт також повинен бути виділений.

Для з'єднання компонентів провідниками потрібно підвести курсор миші до виводу компонента. При цьому на виводі компонента з'явиться більша чорна точка (див. рис.1.9). Натиснувши ліву кнопку миші, перемістять її курсор до виводу компонента, з яким потрібно з'єднатися, і відпустити кнопку миші. Виводи компонентів з'єднуються провідником.

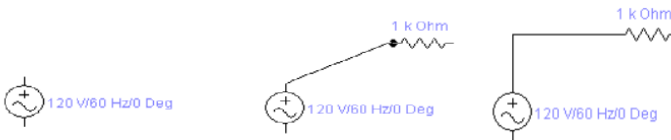


Рисунок 1.9 - З'єднання компонентів

Усі провідники в EWB за замовчуванням чорного кольору, але колір провідника можна змінити. Для цього потрібно подвійним клацанням на зображенні провідника відкрити вікно, наведене на рисунку, і у вікні мишею вибрати необхідний колір.

Якщо в схемі компоненти розміщені неакуратно, то може знадобитися спрямити провідники, що з'єднують компоненти. Це можна зробити, перемістивши компоненти так, щоб провідники відображалися прямими лініями.

Після того, як схема побудована, можна вставити в неї додаткові компоненти. Для цього потрібно мишею перемістити компонент у необхідну точку схеми і, помістивши його над провідником, відпустити кнопку миші. Компонент автоматично вставиться в коло, як показано нижче на рис. 1.10.

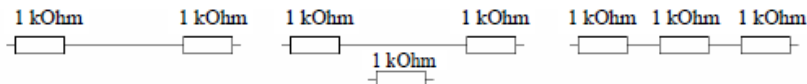


Рисунок 1.10 - З'єднання компонентів

Для успішного виконання лабораторних робіт необхідно до початку занять:

- прочитати опис чергової лабораторної роботи, повторити необхідні розділи теоретичного курсу по конспекту лекцій, даним методичним вказівкам і рекомендованій літературі, підготувати усні відповіді на контрольні запитання.

- підготувати бланк звіту, що повинен містити титульний аркуш (зразок наведено у додатку А), мету роботи, схеми та таблиці з розділу "Робоче завдання", виконано розрахунок завдання з розділу "Підготовча робота". Креслення повинні виконуватись із застосуванням креслярського приладдя у відповідності з вимогами Держстандарту України.

Під час лабораторної роботи необхідно:

- одержати дозвіл викладача на виконання лабораторної роботи.
- ознайомитися з робочим місцем, вимірювальними приладами, джерелами енергії, вимикачами та ін.
- скласти електричне коло. Провести необхідні виміри, результати вимірювань показати викладачеві. Лабораторна робота вважається виконаю після того, як викладач зробив помітку у журнал.
- оформити роботу, захистити та здати викладачеві.

РОЗДІЛ 2

ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ

2.1. Лабораторна робота №1. Однофазні випрямлячі

2.1.1. Теоретичні відомості

Випрямлячами називають пристрої, що забезпечують перетворення змінного струму в постійний. Випрямлячі бувають керованими та некерованими. У пристроях першого типу є можливість зміни вихідної напруги, а пристроях другого типу такої можливості немає.

У загальному випадку некерований випрямляч може містити:

- однофазний або трифазний трансформатор для величини напруги на навантаженні випрямляча (або необхідної величини струму в навантаженні);
- діодну (вентильну) групу елементів, що здійснюють власне випрямлення змінного струму;
- згладжуючий фільтр для покращення якості випрямленої напруги. До виходу фільтра підключається навантаження.

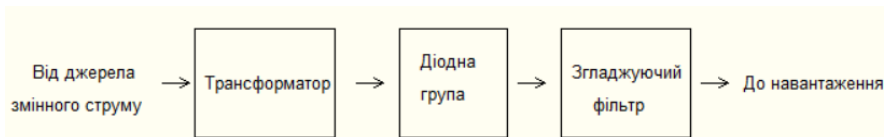


Рисунок 2.1 - Структурна схема некерованого випрямляча

Напругу на навантаженні можна представити у вигляді постійної складової U_n випрямленої напруги на навантаженні (корисна складова) та суми гармонік з частотами, кратними частоті мережі f_c (пульсації випрямленої напруги - шкідлива складова):

$$u_n(t) = U_n + \sum_{i=1}^{\infty} U_{m_i} \sin(2\pi f_c t + \varphi_i),$$

U_{m_i} – амплітуда, φ_i – фаза гармоніки

Найбільш важко піддається фільтрації перша гармоніка, тому за її рівнем прийнято оцінювати практично якість випрямленої напруги. Як числову оцінку використовують коефіцієнт пульсацій

$$K_{\Pi} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} U_{m_i}^2}}{U_{\Pi}} 100 \% \approx \frac{U_{m_1}}{U_{\Pi}} 100 \%,$$

Пульсації напруги на навантаженні можна істотно зменшити, якщо використовувати фільтри, що згладжують, С-, L-, LC і RC-типів. При струмах навантаження до 30...50 А використовують переважно С-фільтри. При струмах навантаження понад 50 А віддають перевагу L-фільтрам. LC-фільтри застосовують при напругах на навантаженні понад 50 В і струмах навантаження до 10...20 А. Масогабаритні показники фільтрів при такому підході виходять мінімальними.

Якість фільтрації прийнято оцінювати коефіцієнтом згладжування

$$S_{\text{згп}} = \frac{K_{\Pi}^{\text{вх}}}{K_{\Pi}^{\text{вих}}},$$

де $K_{\Pi}^{\text{вх}}$, $K_{\Pi}^{\text{вих}}$ - коефіцієнти пульсацій на вході і на виході фільтра, що згладжує, відповідно.

2.1.2. Однофазний однопівперіодний випрямляч

Схема однофазного однопівперіодного випрямляча наведена на рис. 2.2, а часові діаграми, що пояснюють його роботу, на рис. 2.3.

Без фільтра, що згладжує ($C_{\phi} = 0$) робота випрямляча полягає в наступному.

При позитивній півхвилі вхідної напруги u_a діод VD1 відкривається, так як на його аноді виходить позитивне відносно катода миттєве значення напруги. Напруга на навантаженні u_n повторює форму вхідної напруги u_a . Через навантаження протікає позитивна півхвиля струму.

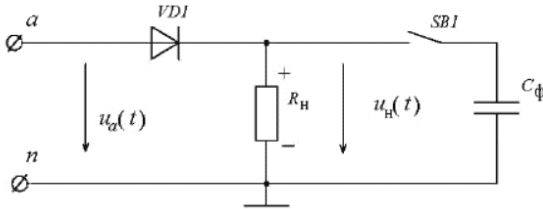
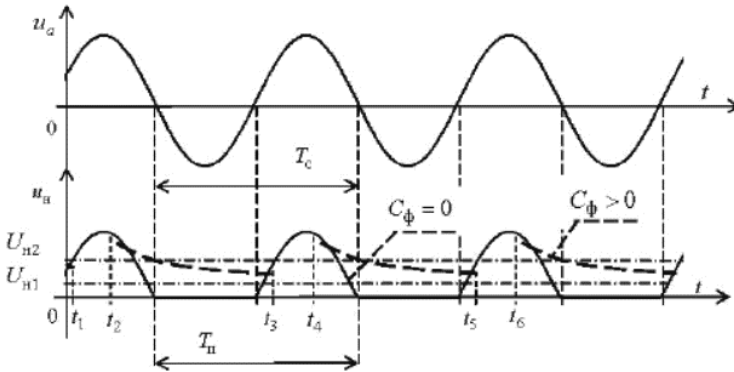


Рисунок 2.2 - Схема однофазного однопівперіодного випрямляча

Рисунок 2.3 - Часові діаграми в однофазному однопівперіодному випрямлячі: u_a та $u_н$ - миттєві значення напруг на вході та навантаженні; $U_{н1}$; і $U_{н2}$ - середні значення напруги на навантаженні при $C_\phi = 0$ і при $C_\phi > 0$, відповідно.

При негативній півхвилі напруги u_a діод VD1 закривається, струм через навантаження не протікає і напруга на навантаженні дорівнює нулю ($U_н = 0$).

Далі всі процеси періодично повторюються і в результаті навантаження формується пульсуюча напруга з частотою пульсацій

$$f_н = \frac{1}{T_н} = f_c = \frac{1}{T_c}.$$

При підключенні С-фільтра на інтервалах часів t_1-t_2 , t_3-t_4 , t_5-t_6 відбувається швидкий заряд конденсатора C_ϕ -фільтра через малий опір відкритого діода (шлях заряду: фаза а - відкритий діод VD1- C_ϕ - нульовий провід n). Наприкінці зазначених інтервалів, тобто. в моменти

t_2, t_4, t_6 т. д. миттєве значення вхідної напруги u_a стає менше, ніж напруга на конденсаторі і діод закривається. Конденсатор C_ϕ починає досить повільно розряджатися через навантаження R_n (шлях розряду: C_ϕ - R_n). Чим більша постійна часу кола розряду тим менше падає напруга на конденсаторі в інтервалах часів. У результаті зменшуються пульсації вихідної напруги і збільшується середнє значення напруги на навантаженні. Чим більше величина конденсатора фільтра, тим більше вираш за постійного опору навантаження R_n .

Роботу С-фільтра можна пояснити іншим чином. При підключенні С-фільтра основна частина змінної складової вихідного струму протікає через конденсатор C_ϕ , який має значно менший опір, ніж R_n . Постійна складова струму протікає лише через R_n . У результаті зменшується амплітуда змінної складової вихідної напруги на навантаженні та зменшується коефіцієнт пульсацій. Виграш тим більший, чим більша величина ємності конденсатора фільтра.

2.1.3. Однофазний однопівперіодний керований випрямляч

Схема однофазного однопівперіодного керованого випрямляча аналогічна схемі, що наведена на рис. 2.2, тільки замість діода стала тиристор.

Тиристор працює як логічний ключ.

Тиристор відкривається (ключ замикається) за наступних умов:

- $u_D \geq 0$ - Напруга на тиристорі позитивна;
- на керуючий електрод подано сигнал керування.

Тиристор закривається (ключ розмикається), коли:

- $i_T \leq 0$ – анодний струм тиристора переходить через нуль у негативному напрямку.

2.1.4. Віртуальний експеримент

Мета роботи

- а) Вивчити схеми та принцип дії однофазних випрямлячів.
- б) Набути практичних навичок з дослідження в оболонці програми EWB процесів в однофазних випрямлячах за допомогою віртуального двоканального осцилографа.
- в) Навчитися експериментально визначати основні параметри однофазних випрямлячів.

Програма роботи:

- а) ознайомитись з інструкцією з використання програми EWB;
- б) вивчити принцип дії випрямлячів за схемами рис. 2.4– 2.5;
- в) виконати дослідження однофазного однопівперіодного віртуального випрямляча;
- г) експериментально визначити вплив конденсатора фільтра на величину постійної складової випрямленої напруги на навантаженні і форму вихідної напруги в однофазному однопівперіодному випрямлячах. Конденсатор ставиться паралельно вентиллю;
- д) скласти звіт про виконану роботу.

2.1.5. Віртуальні установки

Віртуальна установка для проведення експериментів однофазного однопівперіодного некерованого випрямляча наведена на рис. 2.4.

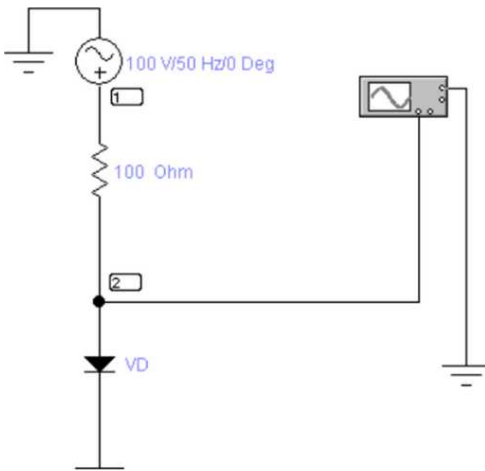


Рисунок 2.4 - Віртуальна установка для проведення експериментів однофазного однопівперіодного випрямляча

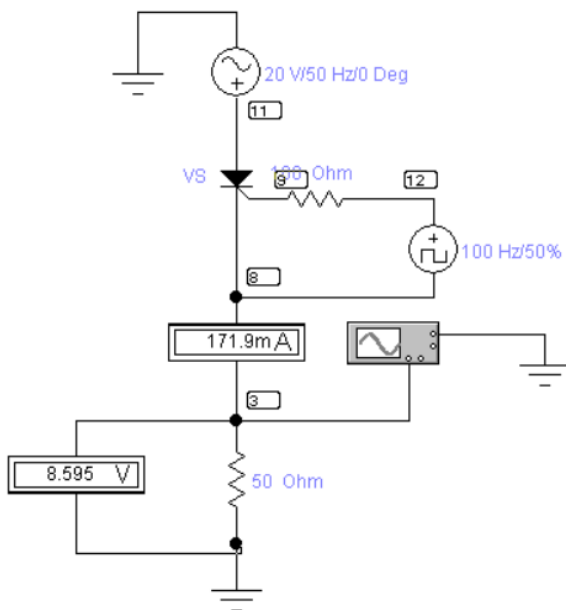


Рисунок 2.5 - Схема однофазного однопівперіодного керованого випрямляча

Порядок виконання роботи:

- відповісти на контрольні питання та отримати дозвіл, розпочати роботу;
- увімкнути комп'ютер та запустити програму EWB;
- з програми EWB скласти схему однофазного некерованого однопівперіодного випрямляча (рис. 2.4) ;
- зберегти відкритий файл під назвою Л4 комп'ютери в папці (File Save M. ... -> вдрукувати ім'я файлу, що зберігається, наприклад W6_Ivanov.ewb натиснути кнопку «Зберегти» за допомогою лівої клав миші;
- здійснити підготовку осцилографа до роботи:
 - подвійним клацанням миші на зображення осцилографа відкрити вікно осцилографа;

2.2. Лабораторна робота №2. Однофазний мостовий випрямляч

Мета роботи:

а) вивчити схеми та принцип дії мостових випрямлячів;
 б) набути практичних навичок з дослідження в оболонці програми EWB процесів в мостових випрямлячах за допомогою віртуального двоканального осцилографа;

в) навчитися експериментально визначати основні параметри мостових випрямлячів.

Схема однофазного некерованого мостового випрямляча наведена на рис. 2.6, а часові діаграми, що пояснюють його роботу, на рис. 2.7.

Для згладжування пульсацій вихідної напруги паралельно навантаженню R_H може підключатися ємнісний фільтр C_Φ .

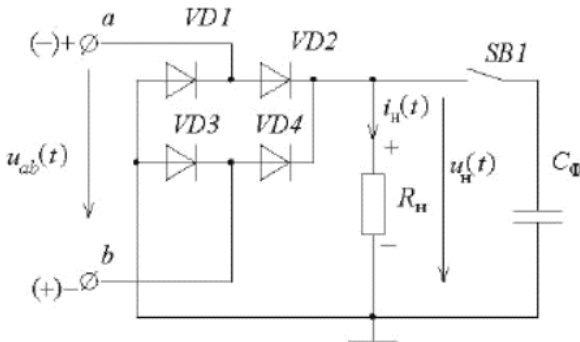


Рисунок 2.6 - Схема однофазного мостового випрямляча

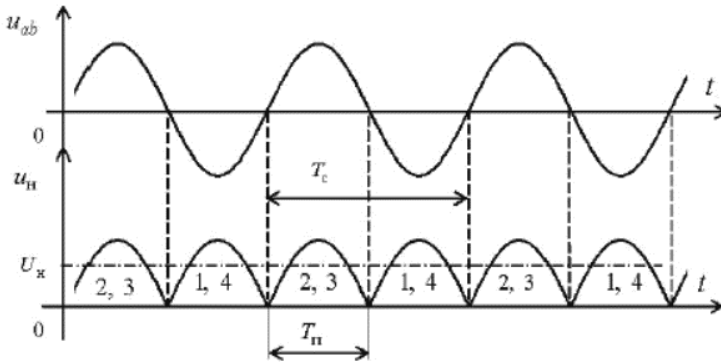


Рисунок 2.7 - Часові діаграми в однофазному мостовому випрямлячі: u_{ab} u_n - миттєві значення вхідної лінійної напруги, напруги на навантаженні; U_n - середнє значення напруги на навантаженні при $C = 0$ (цифри 1, 2, 3 і 4 позначають номери відкритих діодів VD1, VD2, VD3 і VD4)

В однофазному мостовому випрямлячі завжди відкрита пара діодів.

При позитивній півхвилі напруги $u_{ab}(t)$ (на рис. 2.7 показано без дужок) відкриті діоди VD2 і VD3, оскільки напруга на анодах більше, ніж на їх катодах. Діоди VD1 і VD4 в цей час закриті, тому що напруга на їх анодах менша, ніж на їх катодах, в результаті струм протікає по колі: фази а - VD2 - $R_n C$ - VD3 - фази б

При негативній півхвилі напруги $u_{ab}(t)$ (На рис. 2.7 показано у дужках) відкриті діоди VD1 та VD4, оскільки напруга з їхньої анодах більше, ніж з їхньої катодах. Діоди VD2 і VD3 у цей час закриті, оскільки напруга з їхньої анодах менше, ніж з їхньої катодах. У результаті струм протікає колом: фаза б - VD4 - $R_n C$ - VD1

- фаза а. Важливо, що напрями протікання струмів через навантаження при позитивному і негативному півхвилі вхідної напруги збігаються. У результаті виходить подвоєння величини напруги на навантаженні та подвоєння частоти пульсацій (порівняно з однофазним однопівперіодним випрямлячем). Частота пульсацій виходить рівною:

$$f_n = \frac{1}{T_n} = \frac{2}{T_c} = 2f_c.$$

Включення С-фільтра, що згладжує, зменшує амплітуду пульсацій і покращує якість випрямленої напруги.

2.2.1. Віртуальний експеримент

Мета роботи:

- а) в схеми та принцип дії однофазних випрямлячів;
- б) набути практичних навичок з дослідження в оболонці програми EWB процесів в однофазних випрямлячах за допомогою віртуального двоканального осцилографа;
- в) навчитися експериментально визначати основні параметри однофазних випрямлячів.

Програма роботи:

- а) ознайомитись з інструкцією з використання програми EWB;
- б) вивчити принцип дії випрямляча за схемою рис. 2.6;
- в) виконати дослідження однофазного мостового віртуального випрямляча;
- г) експериментально визначити вплив конденсатора фільтра на величину постійної складової випрямленої напруги на навантаженні і форму вихідної напруги в мостовому випрямлячі;
- д) скласти звіт про виконану роботу.

2.2.2. Віртуальні установки

Віртуальна установка для проведення експериментів однофазного однопівперіодного випрямляча наведена на рис. 2.8.

Порядок виконання роботи:

- а) відповісти на контрольні питання та отримати дозвіл, розпочати роботу;
- б) увімкнути комп'ютер та запустити програму EWB;
- в) з програми EWB скласти схему однофазного однопівперіодного випрямляча (рис. 2.8) ;
- г) зберегти відкритий файл під назвою Л4 комп'ютери в папці (File Save M. .. -> вдрукувати ім'я файлу, що зберігається, наприклад W6_Ivanov.ewb натиснути кнопку «Зберегти» за допомогою лівої клавіші миші;

д) здійснити підготовку осцилографа до роботи:

- подвійним клацанням миші на зображення осцилографа відкрити вікно осцилографа;
- збільшити вікно осцилографа натисканням кнопки Expand;
- встановити тривалість розгортки промені каналу А 5мс справ (Time base = 5.00 ms/div) ;
- встановити чутливість відхилення промені по вертикалі каналу А 10 В/діл (Channel A = 10 V/div) ;
- для візуалізації постійної складової напруги навантаженні у секції Channel A натиснути кнопку DC (постійний).

е) Провести дослідження однофазного мостового випрямляча при трьох значеннях ємності конденсатора фільтра (0 мкФ. 120 мкФ та 200 мкФ):

1) зібрати електричну схему однофазного мостового випрямляча (рис. 2.8) та пред'явити її для перевірки інженеру;

2) включити головний перемикач живлення віртуальної схеми. Виміряти за 0 мкФ, 120 мкФ, 200 мкФ середні значення струму навантаження (за допомогою амперметра P_A = середнє значення напруги на навантаженні (за допомогою вольтметра P_V =) та діюче значення змінної складової вихідної напруги $U_{\sim}$ (за допомогою вольтметра P_V ~. Результати вимірювань занести в табл. 2.2;

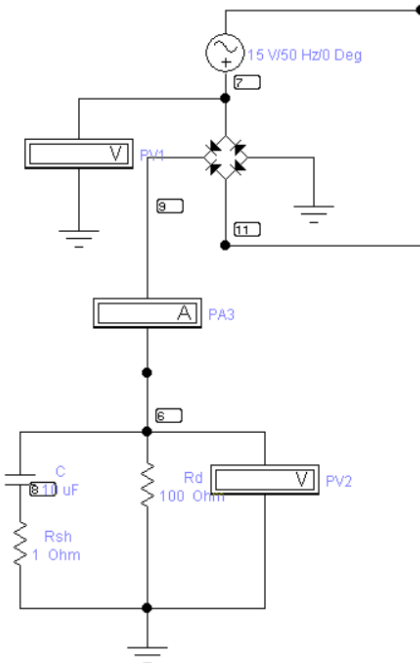


Рисунок 2.8 - Віртуальна установка для проведення експериментів однофазного мостового випрямляча

Таблиця 2.2 Результати вимірювань

Тип випрям- ляча	Uф, В	Tс, мс	fс, Гц	C, мкФ	In, мА	Un, В	Uп, В	Tл, мс	m	Кп теор.	Кп експ.	Un/Uф	di/dt
Однофазний мостовий				0 120 200									

- 3) сфотографувати осцилограми напруги на навантаженні при $C=0, 120$ та 200 мкФ;
- 4) за допомогою осцилографа виміряти:
 - період входного (мережевий) напруги T_c ;
 - період пульсації T_l . ввести дані виміру в табл. 2.2;
- 5) розрахувати та ввести дані розрахунку в табл. 2.2:

- еквівалентна кількість фаз випрямлення

$$m = \frac{T_c}{T_{\Pi}};$$

експериментальне значення коефіцієнта пульсацій

$$K_{\Pi}^{\text{експ}} = \sqrt{2} \frac{U_{\Pi}}{U_H};$$

теоретичне значення коефіцієнта пульсацій

$$K_{\Pi}^{\text{теор}} = \frac{2}{m^2 - 1}.$$

- б) Розрахувати максимальні значення di/dt вентилів.

2.3. Лабораторна робота №3. Однофазний мостовий керований випрямляч

Мета роботи:

а) вивчити схеми та принцип дії мостових керованих випрямлячів;

б) набути практичних навичок з дослідження в оболонці програми EWB процесів в мостових керованих випрямлячах за допомогою віртуального двоканального осцилографа;

в) навчитися експериментально визначати основні параметри мостових керованих випрямлячів.

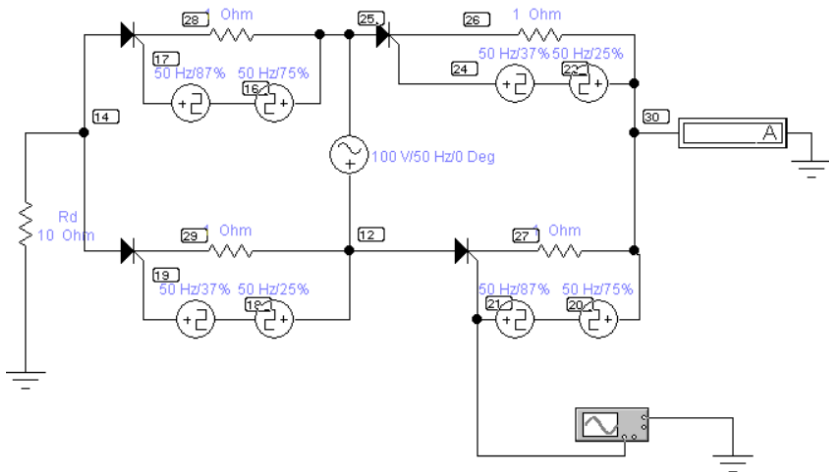


Рисунок 2.9 - Схема однофазного керованого мостового випрямляча.

Схема однофазного керованого мостового випрямляча наведена на рис. 2.9.

Для згладжування пульсацій вихідної напруги паралельно навантаженню R_n може підключатися ємнісний фільтр C_ϕ .

2.3.1. Віртуальний експеримент

Мета роботи:

- вивчити схеми та принцип дії однофазних керованих випрямлячів;
- набути практичних навичок з дослідження в оболонці програми EWB процесів в однофазних випрямлячах за допомогою віртуального двоканального осцилографа;
- навчитися експериментально визначати основні параметри однофазних випрямлячів.

Програма роботи:

- ознайомитись з інструкцією з використання програми EWB;
- вивчити принцип дії випрямлячів за схемою рис. 2.9;

- в) виконати дослідження керованого однофазного мостового віртуального випрямляча;
- г) експериментально визначити вплив конденсатора фільтра на величину постійної складової випрямленої напруги на навантаженні і форму вихідної напруги в однофазному мостовому випрямлячі;
- д) скласти звіт про виконану роботу.

2.3.2. Віртуальні установки

Віртуальна установка для проведення експериментів керованого однофазного мостового випрямляча наведена на рис. 2.9.

Порядок виконання роботи:

- а) відповісти на контрольні питання та отримати дозвіл, розпочати роботу;
- б) увімкнути комп'ютер та запустити програму EWB;
- в) з програми EWB скласти схему керованого однофазного мостового (рис. 2.9);
- г) зберегти відкритий файл під назвою ЛЗ комп'ютери в папці (File Save M. ... -> вдрукувати ім'я файлу, що зберігається, наприклад W6_Ivanov.ewb натиснути кнопку «Зберегти» за допомогою лівої клавіші миші;
- д) здійснити підготовку осцилографа до роботи:
 - подвійним клацанням миші на зображення осцилографа відкрити вікно осцилографа;
 - збільшити вікно осцилографа натисканням кнопки Expand;
 - встановити тривалість розгортки промені каналу А 5мс (Time base = 5.00 ms/div),
 - встановити чутливість відхилення промені по вертикалі каналу А 10 В/діл (Channel A = 10 V/div),
 - для візуалізації постійної складової напруги навантаженні у секції Channel A натиснути кнопку DC (постійний).
- е) провести дослідження випрямляча при трьох значеннях ємності конденсатора фільтра ($C=0$ мкФ, $C=120$ мкФ, $C=200$ мкФ):
 - 1) включити головний перемикач живлення віртуальної схеми (У верхньому правому куті робочого вікна програми EWB). Виміряти

при $C=0$ мкФ. $C = 120$ мкФ. $C=200$ мкФ середні значення струму навантаження (за допомогою амперметра PA DC, середні значення напруги U_n на навантаженні (за допомогою вольтметра PV DC і значення змінної складової вихідної напруги $U_{\sim}$ (за допомогою вольтметра PV AC). Результати вимірювань занести до табл. 2.2;

2) сфотографувати осцилограми напруги на навантаженні при $C=0$ мкФ, 120мкФ та 200 мкФ;

3) за допомогою осцилографа виміряти:

- період вхідної (мережевої) напруги T_c ;
- період пульсації T_n . Ввести дані вимірів у табл. 2.2;

ж) провести дослідження однофазного мостового керованого випрямляча при трьох значеннях ємності конденсатора фільтра (0 мкФ. 120 мкФ та 200 мкФ):

1) зібрати електричну схему однофазного мостового керованого випрямляча (рис. 2.30) та пред'явити її для перевірки інженеру;

2) включити головний перемикач живлення віртуальної схеми. Виміряти за 0 мкФ, 120 мкФ, 200 мкФ середні значення струму навантаження (за допомогою амперметра PA=, середні значення напруги на навантаженні (за допомогою вольтметра PV=) та діюче значення змінної складової вихідної напруги $U_{\sim}$ (за допомогою вольтметра PV~. Результати вимірювань занести в табл. 2.2.

2.4. Лабораторна робота №4. Трифазний випрямляч з нульовим виводом

2.4.1. Схема

Схема трифазного некерovanого випрямляча з нульовим виводом наведено на рис. 2.10, а на рис. 2.11 наведено часові діаграми, що пояснюють його роботу. По суті, він складається із трьох ідентичних однофазних випрямлячів, які працюють на загальне навантаження. Проте ці три однофазних випрямлячі виявляються взаємозалежними з допомогою об'єднання діодів в катодну групу.

У катодній групі може бути відкритим лише один діод (процеси перемикання ми виключаємо з розгляду). Відкритим виявляється той діод, у якого миттєве значення напруги на аноді виявляється позитивним та найбільшим. На інтервал часу t_1-t_2 , найбільшим виявляється напруга u_a фази а і відкритий діод VD1. На інтервалі часу t_2, t_3 найбі-

льшою виявляється напруга u_b фази b і відкритий діод VD2. У інтервалі часу t_3-t_4 , найбільшим виявляється напруга u_c фази c і відкритий діод VD3.

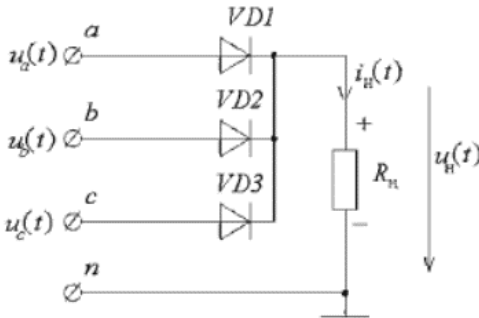


Рисунок 2.10 - Схема трифазного випрямляча з нульовим виводом

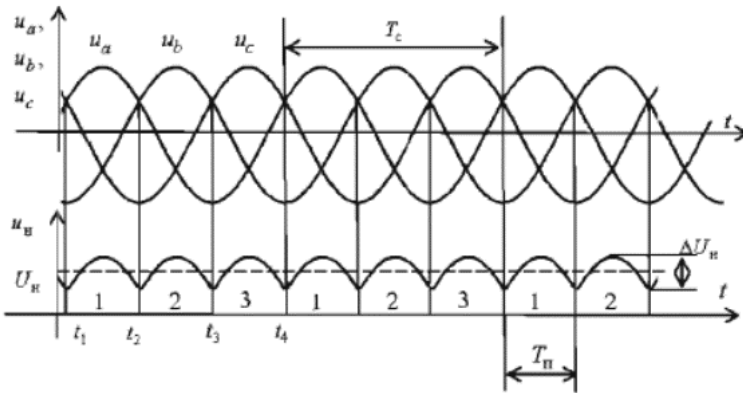


Рисунок 2.11 - часові діаграми у трифазному випрямлячі з нульовим виводом:

u_a, u_b, u_c - миттєві значення фазної напруги; u_n - миттєве значення напруги на навантаженні; U_n - середнє значення напруги на навантаженні (цифри 1, 2, 3 позначають номери відкритих діодів VD2, VD1 та VD3); ΔU_H - максимальна зміна миттєвої напруги на навантаженні.

При симетрії фаз мережі всі діоди знаходяться в рівному положенні, тому кожен з них виявляється відкритим протягом однієї третини періоду напруги мережі

$$t_{\text{отк}} = \frac{T_c}{3} = \frac{1}{3f_c},$$

де T_c – період, f_c – частота мережі

Завдяки трифазному джерелу якість випрямленої напруги виходить краще, ніж однофазних схемах. З графіків на рис. 2.11 видно зменшення (порівняно з раніше розглянутими схемами випрямлячів) коефіцієнта пульсацій

$$K_{\text{п}} = \frac{U_{m1}}{U_{\text{п}}} \approx \frac{\Delta u_{\text{п}}}{2U_{\text{п}}}.$$

Більше втричі частоти мережі виявляється і частота пульсацій вихідної напруги

$$f_{\text{п}} = \frac{1}{T_{\text{п}}} = \frac{3}{T_c} = 3f_c,$$

що полегшує фільтрацію вихідної напруги випрямляча.

2.4.2. Віртуальний експеримент

Мета роботи:

- а) вивчити схеми та принцип дії трифазних випрямлячів;
- б) набути практичних навичок з дослідження в оболонці програми EWB процесів в однофазних і трифазних випрямлячах за допомогою віртуального двоканального осцилографа;
- в) навчитися експериментально визначати основні параметри трифазних випрямлячів.

Програма роботи:

- а) ознайомитись з інструкцією з використання програми EWB;
- б) вивчити принцип дії випрямляча за схемою рис. 2.10;
- в) виконати дослідження віртуального трифазного випрямляча з нульовим виводом;
- г) експериментально визначити вплив конденсатора фільтра на величину постійної складової випрямленої напруги на навантаженні і форму вихідної напруги в однофазному однопівперіодному і в мостовому випрямлячах;
- д) скласти звіт про виконану роботу.

2.4.3. Віртуальна установка

Віртуальна установка для проведення експериментів з напівпровідниковими випрямлячами (рис. 2.12) включає:

- Трифазне джерело живлення з фазними виводами А, В, С та виведенням нейтральній точки N. Трифазне джерело живлення моделюється за допомогою трьох джерел E_a , E_b , E_c синусоїдальної напруги з діючими значеннями напруги 100 В і частотою 50 Гц. Усі три джерела синхронізовані та мають початкові фази 0° , 120° і 240° відповідно.

- Випрямні діоди VD1, VD2, VD3, VD4, VD5, VD6. типу D1N4004GP.

- Опір навантаження $R = 100$ Ом.

- Ємнісний С-фільтр. Значення ємності встановлюються, в залежності від досвіду, рівними 0 мкФ (ємність відключається), 120 мкФ та 200 мкФ.

- Двопроменевий осцилограф PG.

- Цифрові вимірювальні прилади - амперметр PA та два вольтметра PV= PV $\sim$. Вольтметр PY= налаштований на режим вимірювання постійної напруги (режим DC), а вольтметр PV $\sim$ налаштований на режим вимірювання змінної напруги (режим AC). Внутрішнє опір амперметра встановлюється рівним 1 МОм, а внутрішній опір вольтметрів - 1 МОм.

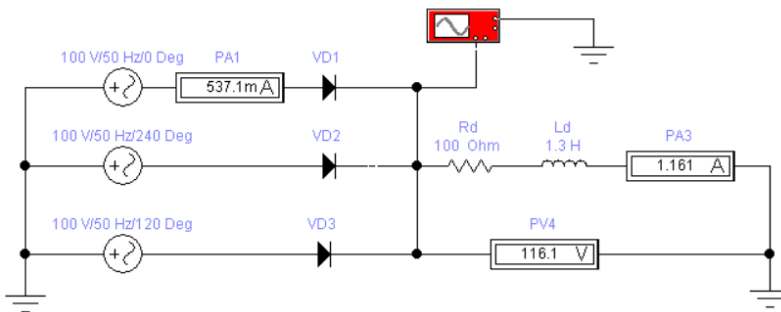


Рисунок 2.12 - Схема трифазного випрямляча з нульовим виводом

2.4.4. Порядок виконання роботи:

- а) відповісти на контрольні питання та отримати дозвіл розпочати роботу;
- б) увімкнути комп'ютер та запустити програму ElectronicsWorkbench;
- в) запустити програму EWB, скласти схему 2.12;
- г) зберегти відкритий файл під назвою Л4 комп'ютери в папці (File Save M. .. -> вдрукувати ім'я файлу, що зберігається, наприклад W4.ewb натиснути кнопку «Зберегти» за допомогою лівої клав миші;
- д) здійснити підготовку осцилографа до роботи:
 - подвійним клацанням миші на зображення осцилографа відкрити вікно осцилографа;
 - збільшити вікно осцилографа натисканням кнопки Expand;
 - встановити тривалість розгортки промені каналу А 5мс справ (Time base = 5.00 ms/div);
 - встановити чутливість відхилення промені по вертикалі каналу А 10 В/діл (Channel A = 10 V/div);
 - для візуалізації постійної складової напруги навантаженні у секції Channel A натиснути кнопку DC (постійний);
- е) Провести дослідження однофазного однопівперіодного випрямляча при трьох значеннях ємності конденсатора фільтра ($C=0$ мкФ, $C=120$ мкФ, $C=200$ мкФ):
 - 1) включити головний перемикач живлення віртуальної схеми (У верхньому правому куті робочого вікна програми EWB). Виміряти при $C=0$ мкФ. $C = 120$ мкФ. $C=200$ мкФ середні значення струму навантаження (за допомогою амперметра РА), середні значення напруги U_n на навантаженні на навантаженні (за допомогою вольтметра PV=) і значення змінної складової вихідної напруги $U_{\sim}$, (за допомогою вольтметра PY~). Результати вимірювань занести до табл. 2.3;
 - 2) сфотографувати осцилограми напруги на навантаженні при $C=0$ мкФ, 120 мкФ та 200 мкФ;
 - 3) за допомогою осцилографа виміряти:
 - період вхідної (мережевої) напруги T_c ;
 - період пульсації T_n ;
 Ввести дані вимірів у табл. 2.3;
 - 4) розрахувати еквівалентне число фаз випрямлення та дані розрахунку ввести до табл. 2.3

$$m = \frac{T_c}{T_n}.$$

Виміряти за 0 мкФ. 120 мкФ. 200 мкФ середні значення струму навантаження (за допомогою амперметра РА). середнє значення напруги на навантаженні (за допомогою вольтметра РV=) та діюче значення змінної складової вихідної напруги U (за допомогою вольтметра РV. Результати вимірювань занести в табл. 2.3;

Таблиця 2.3 Результати вимірювань

Тип випря- мляча	U ф, В	T с, м с	F с, Г ц	C, мк Ф	I _н , м А	U н, В	U п, В	T л, м с	m	Кп тео р,	Кп екс п,	U н/ U ф,	di/ dt,
Трифазний з нульовим виводом				0									

5) сфотографувати осцилограми напруги на навантаженні при C=0, 120 та 200 мкФ;

- 6) за допомогою осцилографа виміряти:
- період вхідної (мережевої) напруги T_c ;
 - період пульсації T_n .

Ввести дані виміру в табл. 2.3г4

7) розрахувати та ввести дані розрахунку в табл. 2.3:

- еквівалентна кількість фаз випрямлення

$$m = \frac{T_c}{T_n};$$

експериментальне значення коефіцієнта пульсацій

$$K_n^{\text{експ}} = \sqrt{2} \frac{U_n}{U_n};$$

теоретичне значення коефіцієнта пульсацій;

ж) зібрати схему трифазного випрямляча з нульовим виводом (рис. 2.12) ;

з) використовуючи послідовність дій, викладену пп. 1)-7), провести віртуальний експеримент. Отримані результати занести до табл. 2.8;

і) вимкнути живлення моделюючої установки та розібрати схему;

к) провести віртуальний експеримент, змінивши чутливість відхилення променю по вертикалі каналу А до 20 В/діл ($\text{Channel A} = 20 \text{ V/div}$). Отримані результати занести до табл. 2.3.

Зміст звіту:

- а) мета роботи;
- б) схеми досліджуваних випрямлячів;
- в) таблиця з результатами вимірів та обчислень;
- г) осцилограми напруги на навантаженні;
- д) короткі висновки щодо роботи.

Контрольні питання

До допуску досліджень відповісти на питання.

- а) Яка мета та програма роботи?
- б) У чому полягає призначення випрямляча?
- в) З яких основних вузлів складається випрямляч?
- г) При якій напрузі між анодом та катодом діод знаходиться у відкритому стані?
- д) При якій напрузі між анодом та катодом діод знаходиться у закритому стані?
- е) Чому дорівнює падіння напруги на відкритому діоді?
- ж) Який принцип дії трифазного випрямляча з нульовим виводом?
- з) Як впливає на роботу випрямляча конденсатор фільтра?
- і) Від чого залежить швидкість розряду конденсатора фільтра?
- к) Як визначається середнє значення випрямленої напруги?
- л) Що таке коефіцієнт пульсацій?

При захисті результатів роботи потрібно вміти пояснити принцип дії всіх досліджених випрямлячів та бути готовим до наступних питань.

- Який шлях проходження струму у схемі трифазного випрямляча з нульовим виводом при завданні миттєвих значень напруги на висновках трифазного джерела напруги?

- Як змінюється форма напруги на навантаженні за зміни величини ємності фільтра?
- Чому при підключенні ємнісного фільтра відбувається збільшення середнього значення вихідної напруги випрямляча?

2.5. Лабораторна робота № 5. Моделювання некерованого трифазного мостового випрямляча

Мета: дослідження електромагнітних процесів в пристроях силової електроніки за урахуванням етапу комутації вентилів

2.5.1 Завдання до досліджень

Скласти модель відповідно до рис. 2.13.

Запустите процес симуляції й проаналізуйте її результати. Одержите осцилограми струмів і напруг на останньому періоді напруги мережі.

Розрахуйте час, за яке процес досягне сталого стану. Розрахуйте й установите параметри навантаження таким чином, щоб процес установився за заданий час симуляції 0.06 с і струм навантаження залишався ідеально згладженим.

2.5.2. Зміст звіту по лабораторній роботі

Звіт по лабораторній роботі оформляється на комп'ютері й повинен містити:

- назву, тему й ціль роботи;
- досліджувані моделі відповідно до рис. 2.13;
- діаграми результатів симуляції електромагнітних процесів у схемі й дані цифрових вимірювальних приладів;
- діаграми результатів симуляції електромагнітних процесів у схемі й дані цифрових вимірювальних приладів при зміні параметрів навантаження й діодів (значення змінених параметрів повинні бути зазначені);
- висновки повинні пояснювати результати експериментів.

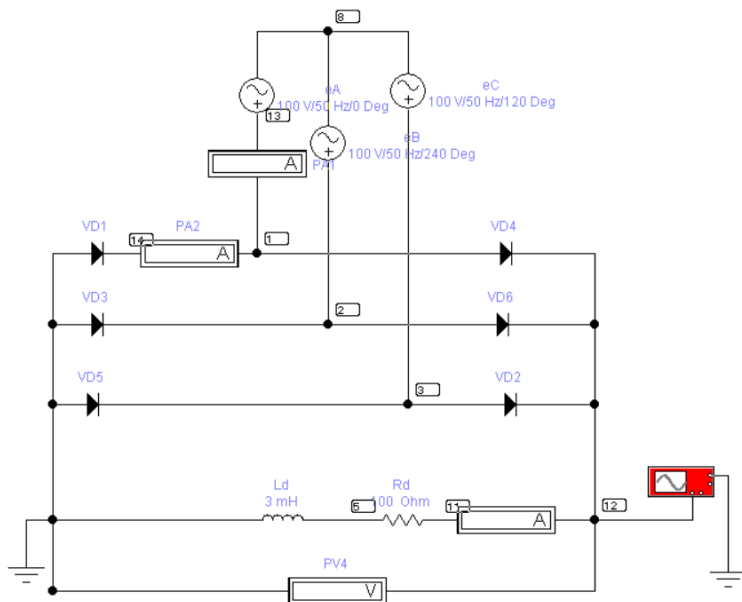


Рисунок 2.13 - EWB-модель трифазного некерованого мостового випрямляча

2.6. Лабораторна робота №6. Моделювання керованого трифазного мостового випрямляча

Мета: Дослідження електромагнітних процесів керованого трифазного мостового випрямляча

2.6.1. Модель

Скласти модель відповідно до рис. 2.15.

На схемі живлення застосуємо від трьох джерел синусоїдальної напруги  100 V/50 Hz/0 Deg, які зсунуті по фазі на 120° . Усі три джерела синхронізовані та мають початкові фази 0° , 120° і 240° відповідно.

Сигнали керування тиристорами здійснюємо за допомогою генератора Clock  50 Hz/50%. Генератор Clock видає прямокутні сиг-

нали заданої частоти, заданої щільності у відсотках. Причому, ненульові значення сигналу даються у кінці періоду. Щоб задати позитивний імпульс керування тиристором заданого зсуву використаємо по 2 генератора, які включаються послідовно зустрічно. Сигнали керування подаються згідно діаграмі, що наведена на рис. 2.14.

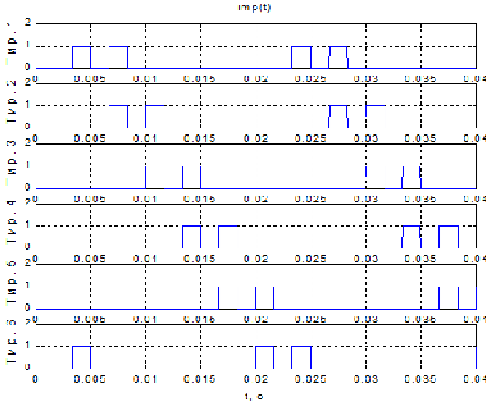


Рисунок 2.14 - Діаграма подачі керуючих імпульсів на тиристор.

Задається довжина імпульсу `dimp_grd` і зсув його початку від нуля ЕРС фази А у градусах `alf`. Для розрахунку параметрів генераторів Clock застосуємо програму на мові Octave:

```
% Формування індикатора подачі широких управл імпульсів
% на всіх тиристорах в поточний момент часу t
% dimp_grd - ширина управл імпульсів в градусах
% alf - кут управління тиристорів в градусах
clear
clc
T=0.02;%
alf=35;          % зсув у градусах
dimp_grd=25;%    % ширина імпульсів у градусах
alfT=alf*T/360.0; % зсув у часі
dimp=dimp_grd*T/360.0; % ширина імпульсів у часі
% зсув початка імпульсів + у часі
tsdv(1)=T/12.0+alfT; % ОСНОВНІ ІМП
```

```

tsdv(2)=3.0*T/12.0+alft;
tsdv(3)=5.0*T/12.0+alft;
tsdv(4)=7.0*T/12.0+alft;
tsdv(5)=9.0*T/12.0+alft;
tsdv(6)=11.0*T/12.0+alft-T;
% зсув кінця імпульсів - у часі
tsdv_(1)=T/12.0+alft+dimp;      % ОСНОВНІ ІМП
tsdv_(2)=3.0*T/12.0+alft+dimp;
tsdv_(3)=5.0*T/12.0+alft+dimp;
tsdv_(4)=7.0*T/12.0+alft+dimp;
tsdv_(5)=9.0*T/12.0+alft+dimp;
tsdv_(6)=11.0*T/12.0+alft+dimp-T;

tsdvd(1)=T/12.0+alft+T/6.0; % ДУБЛЮЮЧИ ІМП
tsdvd(2)=3.0*T/12.0+alft+T/6.0;
tsdvd(3)=5.0*T/12.0+alft+T/6.0;
tsdvd(4)=7.0*T/12.0+alft+T/6.0;
tsdvd(5)=9.0*T/12.0+alft+T/6.0;
tsdvd(6)=11.0*T/12.0+alft+T/6.0;
%
% зсув кінця імпульсів - по часу
tsdvd_(1)=T/12.0+alft+dimp;      % дублюючі імпи
tsdvd_(2)=3.0*T/12.0+alft+dimp;
tsdvd_(3)=5.0*T/12.0+alft+dimp;
tsdvd_(4)=7.0*T/12.0+alft+dimp;
tsdvd_(5)=9.0*T/12.0+alft+dimp;
tsdvd_(6)=11.0*T/12.0+alft+dimp;
for k=1:6
    % зсув початка імпульсів + у відсотках
    impo_p_prc(k)=(T-tsdv(k))*100/T; % +
    % зсув кінця імпульсів - у відсотках
    impo_m_prc(k)=(T-tsdv_(k))*100/T;% -
end
disp(' ОСНОВНІ ІМП + ')
disp(tsdv);%
disp(' ОСНОВНІ ІМП - ')
disp(tsdv_);% -
disp(' ОСНОВНІ ІМП + %')
```

```

disp(impo_p_prc);%
disp(' ОСНОВНІ ІМП - %')
disp(impo_m_prc);% -

```

При $\alpha = 35^\circ$; $d_{imp_grd} = 25$ розрахунок дає відсотки щільності для генераторів Clock тиристорів з номером:

Джерела Clock, що включені позитивно:

№ 1	2	3	4	5	6
0.0036	0.0069	0.0103	0.0136	0.0169	0.0003

Джерела, що включені негативно:

№ 1	2	3	4	5	6
0.0050	0.0083	0.0117	0.0150	0.0183	0.0017

ОСНОВНІ ІМП + %

81.9444	65.2778	48.6111	31.9444	15.2778	98.6111
---------	---------	---------	---------	---------	---------

ОСНОВНІ ІМП - %

75.0000	58.3333	41.6667	25.0000	8.3333	91.6667
---------	---------	---------	---------	--------	---------

2.6.2 Завдання до досліджень

Складіть схему трифазного керованого мостового випрямляча рис. 2.15.

2.6.3. Процес симуляції.

Запустите процес симуляції. Для цього натисніть кнопку Analysis /Transient . Відкриється вікно рис. 2.16 . Задаймо час симуляції 0,03 с. Будемо аналізувати напругу вузла 18. Тиснемо Simulate й отримаємо епюру рис. 2.17. Для то, щоб аналізувати напругу на іншим вузлу, треба перенести заземлювач на протилежний вузол, задати номер потрібного вузла й провести симуляцію.

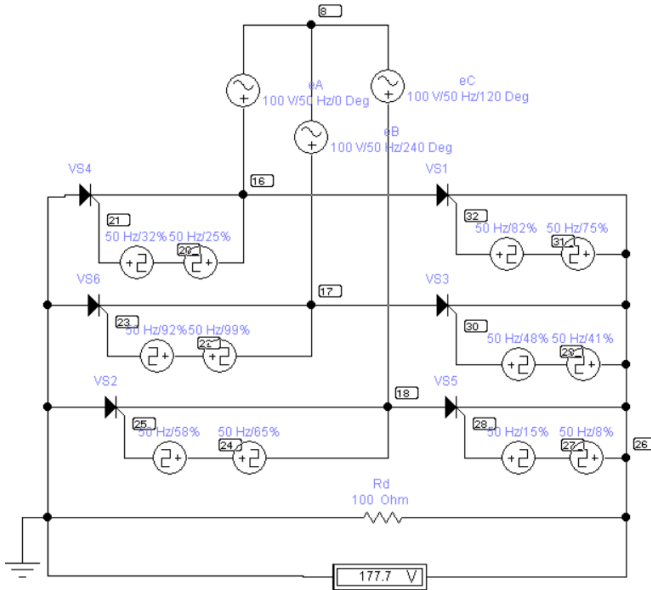


Рисунок 2.15 - Схема трифазного керованого мостового випрямляча

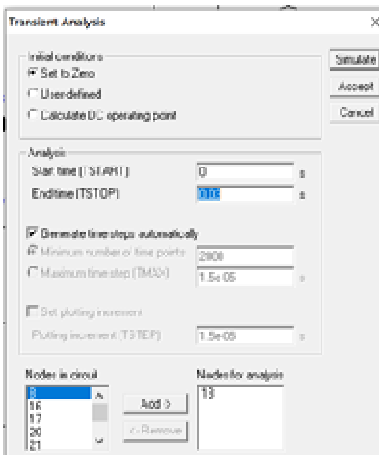


Рисунок 2.16 - Вікно параметрів симуляції.

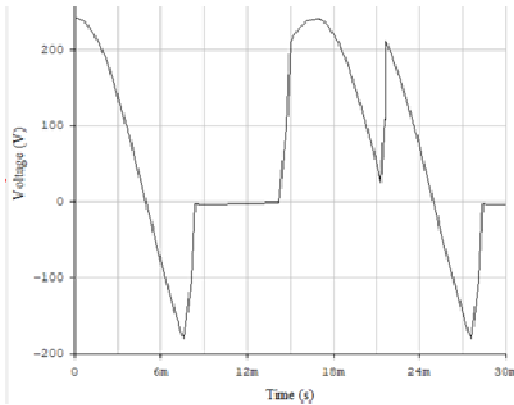


Рисунок 2.17 - Осцилограма напруги вузла 18.

Проаналізуйте результати симуляції. Одержите осцилограми напруг на періоди напруги мережі.

Розрахуйте й установите параметри навантаження таким чином, щоб процес установився за заданий час симуляції 0.06 с і струм навантаження залишався як умово згладженим.

2.6.4. Зміст звіту по лабораторній роботі

Звіт по лабораторній роботі оформляється на комп'ютері й повинен містити:

- назву, тему й мету роботи;
- досліджувані моделі відповідно до рис. 2.15;
- діаграми результатів симуляції електромагнітних процесів у схемі й дані цифрових вимірювальних приладів;
- діаграми результатів симуляції електромагнітних процесів у схемі й дані цифрових вимірювальних приладів при зміні параметрів навантаження (значення змінених параметрів повинні бути зазначені);
- висновки повинні пояснювати результати експериментів;

2.7 Лабораторна робота №7. Моделювання аварійних процесів у трифазних керованих пристроях силової електроніки

Мета: дослідження режимів внутрішнього короткого замикання керованого випрямляча.

2.7.1. Модель трифазного керованого мостового випрямляча

Складіть модель відповідно до рис. 2.18.

2.7.2. Параметри моделі

Параметри навантаження, джерела живлення й приведених фазних опорів показані далі:

Параметри блоків VS1 - VS6:

$E=310\text{ V } 50\text{ Hz}$.

2.7.3. Симуляція.

Запустите модель на симуляцію. Для цього натисніть кнопку Analysis /Transient . Відкриється вікно рис. 2.16 . Задаймо час симуляції 0,03 с. Будемо аналізувати напругу вузла 18. Тиснемо Simulate й отримаємо епюру. Для то, щоб аналізувати напругу на іншим вузлу, треба перенести заземлювач на протилежний вузол, задати номер потрібного вузла й провести симуляцію. Спостерігайте криві фазних напруг E_a, E_b, E_c , імпульси керування, що подаються на тиристори VS1 – VS2, струми вентилів $I_{T1} - I_{T6}$ і напруга навантаження U_d на екрані віртуального осцилографа.

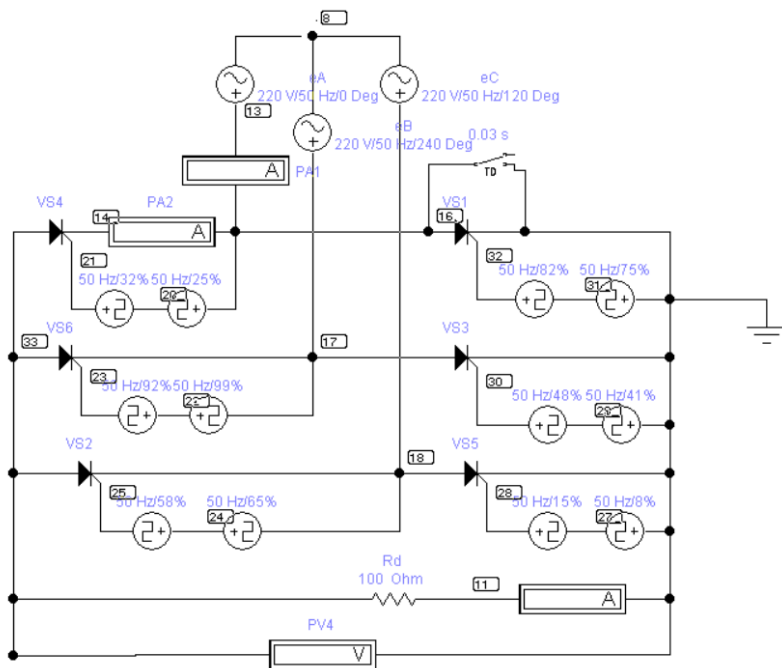


Рисунок 2.18 - Схема трифазного керованого мостового випрямляча для моделювання аварійних процесів

2.7.4. Досліджуйте вплив кута керування α на ударні струми вентилів.

2.7. 5 Зміст звіту по лабораторній роботі

Звіт по лабораторній роботі оформляється на комп'ютері й повинен містити:

- назву, тему й ціль роботи;
- досліджувані моделі відповідно до рис. 2.18;
- діаграми результатів проведених досліджень;
- висновки повинні пояснювати результати експерименті.

2.8. Лабораторна робота № 8. Моделювання процесів у автономному інверторі

Мета: дослідження режимів у автономному інверторі

2.8.1. Модель автономного інвертора

Ознайомтесь з принципами роботи автономного інвертора.
Складіть модель відповідно до рис. 2.19.

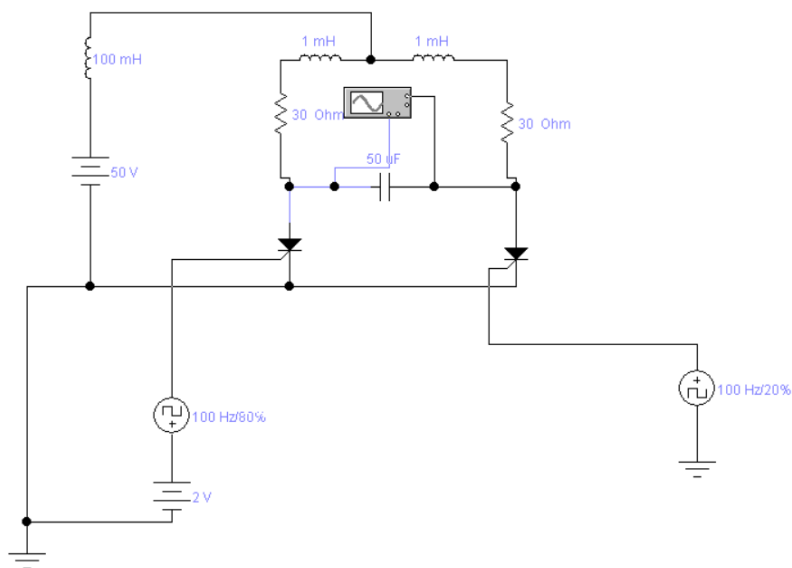


Рис. 2.19. Модель автономного інвертора

2.8.2. Параметри моделі

Параметри навантаження, джерела живлення й приведених фазних опорів показані на моделі рис. 2.19.

2.8.3. Симуляція.

Настроїте осцилограф. Задайте: Time base 5.00ms/div
Cannel A 200 mV/Div, натисніть кнопку AC. Запустите модель на симуляцію. Для цього натисніть кнопку I/O на декі-

лька секунд . Натисніть на іконку осцилографа. Спостерігайте криві напруги на конденсаторі, імпульси керування, що подаються на тиристри напруга навантаження на екрані віртуального осцилографа.

Проаналізуйте результати симуляції. Одержите осцилограми напруг на декількох періодів. Поясніть отримані осцилограми.

ЛІТЕРАТУРА

1. Андрієнко, П. Д. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Оптимізація інженерних та проектних рішень обладнання енергоємних виробництв»/ Коцур, М. І. Андрієнко, П. Д. Безверхня, Ю. С. –Запоріжжя: ЗНТУ 2018.-39 с.
2. Алієв І.І. Віртуальна електротехніка. Комп'ютерні технології в електротехніці й електроніці. М.: Радіософт, 2003. 112 с
3. Лачин В.І., Савелов Н.С. Електроніка. Ростов Н/Д.: Феника, 2000. 448 с.
4. Исаков Ю.А., Платонов А.П., Руденко В.С., Сенько В.Й., Трифонюк В.В., Юдин Э.Э. Основы промышленной электроники.- К.:Техніка,1978 .
5. Довідник з перетворювальної техніки. Під ред. Чиженко І.М.- К.: Техніка, 1978 .
6. Карлащук В.І. Електронна лабораторія на IBM PC. Лабораторний практикум на базі Electronics Workbench і MATLAB. М.: Солон-Р, 2004. 799 с.
7. Розанов Ю.К. Основы силовой электроники. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 296 с.
8. Тиховод С. М. Спектральний метод прискореного моделювання електричних кіл що містять тиристори / С.М. Тиховод, Т.Е. Дивчук, Т. П. Солодовнікова.- Електротехніка та електроенергетика. – 2023. – № 2. – С. 11-15.
9. Загальна електротехніка і основи електроніки: навчальний посібник / Співак В.М., Гуржий А.М., Нельга А.Т., Ітякін О.С.– Київ: КПІ, 2020. – 266 с
10. Тиховод С. М. Методичні вказівки до лабораторних робіт у віртуальній лабораторії з дисципліни "Основи електротехніки та електромеханіки" для студентів спеціальності: 144 «Теплоенергетика» денної та заочної форм навчання (частина 1): Методичні вказівки / С.М. Тиховод, В.В. Козлов, О.В. Набокова, С.О. Лапкіна. – Запоріжжя: Національний університет «Запорізька політехніка», 2023. – 66 с, 2023. – 66 с.
11. Руденко В.С., Сенько В., Чиженко І.М. Основы преобразовательной техники.- М.: ВШ, 1980 .

Додаток А
Зразок титульного аркуша

Міністерство освіти та науки України
Національний університет
«Запорізька політехніка»

Кафедра ЕЕА

Лабораторна робота №1
Однофазні випрямлячи

Допустив

доцент Іванов В.В.

Виконав

ст. гр. Е-414 Бережна А.М.

Прийняв

доцент Іванов В.В.

м. Запоріжжя, 2024 р.